静的加力構造実験とデータ集録方法に関する考察

筑波技術大学　産業技術学部　産業情報学科

浅草 肇

要旨：構造実験を行う際の加力制御方法とデータ集録方法とについて、その手法についてレビューを行う。特に、構成法則に負勾配を有する非線形材料が使用されている場合、その実験挙動は非常に不安定になることから、的確に実験データを集録するために、さらに、ユーザインタフェースの観点からも、専用の制御・測定・集録ソフトウェアが必要であることを解説した。最後にこれらの点と実験データ解析を念頭に置いて新たに作成した制御・測定・集録ソフトウェアについてその特徴を解説するものである。

キーワード：構造実験，加力，制御，収録，ソフトウェア

1．はじめに

構造実験とは、実構造物の一部若しくは全体をモデル化した試験体を作成し、これに外力（複数の場合もある）を加え、これによる試験体各部の変形状態並びに内部のひずみ状態を測定し、その挙動を解明することである。加力の種類としては、作用させる力が時間の関数である場合を動的加力、時間に依存しない場合を静的加力という。動的加力実験は振動台を用いて行われるのが一般的である。静的加力に際しては、汎用の試験器を用いることは、JIS 等に定められる定常的な加力試験以外では、極めてまれなことである。通常は、実験目的に即して、加力装置並びに測定用治具を作成する。

加力の大きさの測定及び変形状態に対応する変位並びにひずみの測定には、図1のホイートストンブリッジ回路を構成して、電気抵抗の変化量として測定する。今、$R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ならば、電位差は、

$$e_b - e_d = \frac{E}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R}\right) \quad (1)$$

として与えられることはよく知られているところである。
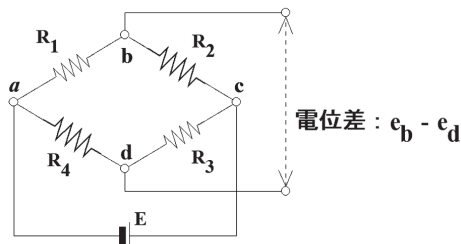
図1　ホイートストンブリッジ回路

ひずみの測定は、$R_2 \sim R_4$ を固定抵抗とし、R_1 として電気抵抗線（ひずみゲージという）を対象物に貼付すると、対象物の変形の伸縮に伴い、この電気抵抗線も伸縮することにより電気抵抗も ΔR_1 だけ変化し、ひずみ：εは $\varepsilon = \frac{1}{K}\frac{\Delta R_1}{R}$ として得られる。ここに、K はひずみゲージごとに校正・決定される定数である。$R_2 \sim R_4$ は固定抵抗であるので、$\Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4 = 0$ であり、（1）式の電位差より直ちにひずみが決定できる。次に、（1）式及び図1において、抵抗 $R_1 \sim R_4$ が同一値 ΔR だけ変化した場合を考える。抵抗 R_1 と R_3 に生じた ΔR は正成分として作用し、抵抗 R_2 と R_4 に生じた ΔR は負成分として作用することがこの回路の特性である。ひずみゲージは電気抵抗線であるので、温度変化により抵抗値が変化する。この温度変化などによる抵抗値の変化をひずみとして検出しないために R_1 に R_2 と同一のひずみゲージを置き、R_1 と R_2 に同時に発生するひずみ以外の成分を相殺させるのがひずみ計測の基本である。

また、この回路特性を利用して、加力の大きさの測定は軸方向ひずみのみが検出できるような回路構成を行い、ひずみとして計測し、フックの法則によりひずみから応力への換算を行い、力への変換処理を行う。変形状態に対応する変位の測定の場合には、軸方向ひずみを相殺し、曲げ変形成分のみが卓越して検出できるような回路構成を行うか或いは摺動抵抗を用いた回路構成により、ひずみとして計測する。変位への変換はひずみ−変位の校正値により変換処理を行う。

このように、測定対象がいずれの場合でも、実験挙動

の測定には、ひずみ測定器を使用する。また、静的加力の場合には、測定対象ごとの測定時の時間のずれは無視できるので、同一の測定回路を測定対象のブリッジ回路に順次切り替えてひずみ測定を行い記録できるのに対して、動的加力では全測定対象に対して同時刻の測定データが必要なので、ブリッジ回路ごとに測定回路を併設し、時間の連続量として、ひずみ測定を行い記録する点が大きく異なる。

また、実験終了後のデータ解析においては、静的加力では一測定当たりの測定対象数が多く、動的加力では一測定当たりの測定対象数は少ないものの時間の連続性を再現するために多大なデータ量を扱うことになる。いずれにしても、いかにして膨大な測定データを処理するかというのがデータ解析における懸案であった。これを解決したのが、パーソナルコンピュータ（以降、パソコンという）の出現であった。

今日では常識的にパソコンによりデータ解析が行われるようになった道程を解説するとともに、ひずみ測定器からのデータ収集専用としてマザーボード回路に特別処置を行っていたパソコンが消失したことに加えて、ひずみ測定器も最新式のものに変更したので、新たに実験データ集録処理ソフトウェアを開発せざるを得ない環境になったので、合わせて報告する。

2. 構造実験とデータ収録方法

加力方法として、動的加力の場合は実際に観測された地震波形の振幅を調整して、実時間で再現するのが一般的であり、その実験時間も地震動の期間にほぼ一致するので最大でも数分間である。データ処理方法は、全データをオープンリール装置などにアナログ量として記録し、実験終了後にその波形を紙面上に再現し、手作業により、数量化を行っていたのが最初であり、次の世代ではA-D変換器により数量化を図るようになった。デジタル技術の進歩とともに、実験段階でA-D変換を行いデジタル量として記録することが可能となった。

静的加力の場合は単調に一方向に加力する場合と、地震を想定した繰り返して加力する場合があるが、いずれの場合にも、その制御方法としては、主として、二つに大別できる。制御の目的は、特異点を含めて、全ての実験データを連続量として、再現できることである。このことは、特異点、例えば、急激な荷重の増減、或いは、急激な変位の増大などをリアルタイムで検出し、その時点のデータを適切に取得する必要がある。また、繰り返し加力の場合は、繰返し地点の見極めなどを行うための情報も必要となってくる。

①荷重制御：試験体全体が弾性体と見なせる場合、荷重の増分とこれに対応する変位増分或いはひずみ増分は線形であり、かつ、一般的には、荷重増分に対して、変位増分は極めて小さい。このような場合は、荷重増分が一定となるような間隔でデータの測定・集録を行う。

②変位制御：加力がある値を超え試験体の一部分が塑性変形領域に到達した場合、或いは、材料が非線形材料で作成されている場合、荷重増分と変位増分との関係は線形ではなくなる。特に非線形材料の構成則が負勾配域に至った場合には、変位が増加しているにもかかわらず荷重は減少するような不安定な挙動を示すことになる（実験装置の剛性が試験体の剛性に比べて小さい場合には明瞭な不安定挙動となり極めて危険である）。このような領域の挙動を測定する場合には、変位増分を制御値として用いて、変位増分が一定間隔となるように慎重にデータの測定・集録を行わなければならない。

ひずみ測定器の主な変遷は次のように分類できる。

- I　アナログ表示、測定回路手動切換、手書き記録
- II　デジタル表示、測定回路手動切換、手動印字
- III　測定回路自動切換、自動印字
- IV　穿孔紙テープ出力
- V　外付けインターフェース出力
- VI　インターフェース内蔵

上記IIIまでが、パソコン以前の時代で、多量のデータ処理を行うために、手入力により計算機が認識できる何らかの媒体（紙カード、穿孔紙テープ、フレキシブルディスク等）に記録をしていた時代であった。

IVがパソコンの出現と前後する。測定器から直接穿孔紙テープに出力が得られ、それをパソコンに読み込ませることができた点で画期的であったが、その処理速度は遅く、また、紙テープ媒体と言うことで、安定性に欠けるものであった。

Vの時に、初めて実験室にパソコンが入った。RS232Cインターフェース、GPIBインターフェースを経由して、パソコンへ直接データ転送が可能となり、その場で、データ解析が行える環境が整ったことになる。しかし、まだ、測定の主役はひずみ測定器であった。

VIの時代には、測定器本体にマイクロプロセッサーが組み込まれたことにより、インターフェースが内蔵され、パソコンへのデータ転送だけではなく、パソコン側から、測定器の制御が可能となった。このことにより、必要なときに、必要なデータをパソコン側から随時取得することが可能となった。ひずみ測定器は、パソコンの外部装置となり、それまでの実験方法が一新された。

次に加力の制御の面から見てみると、上記IVの時代までは、加力に際して、代表的な外力とこれにより生じる変位を随時監視し、これらの値を図化することにより、荷重制御を行うのか、変位制御を行うのかの判断をし、かつ、測定値が連続量と見なせるようにデータの測定・集録を行うのが

通常の手法であった。しかし、図化作業を手動で行うために、それに要する、時間と労力は多大なものがあった。また、時間を要したことから、特異点のデータ取得を逃すこともまれではなかった。また、外力または制御用変位の随時取得に関しては、データ測定機器とは別系統の測定機器回路を設けるなどの必要があり、実験装置の作成費用が割高となった。

Ⅴの時代も基本的には同じ状態が継続した。ただし、パソコンに直接データが入力できたために、簡単なデータ処理結果をパソコンに表示させることが可能となった [1]。この時点のソフトウェアは、まだ、「測定・集録」としての機能であった。

Ⅵの時代に、測定に関しては、パソコンが全ての制御を行えるようになった結果、加力制御のための荷重と変位との関係などの図化も常時自動的にパソコン上で行うことができ、適切な間隔で実験データの測定・集録が行えるようになり、ここに「制御・測定・集録ソフトウェア」として実用に供することができた。なお、このソフトウェアは可能な限り汎用性を確保した設計であったが、実際に実験に投入すると、実験目的ごとに、特に、制御機能部分については、特定用途向けの改修が必要となった。投入例 [2] では、従属関係にある2系統の加力と主要変位を常時監視し、荷重或いは変位制御方式により加力を行った。この「ソフトウェア」無しでは行うことのできない実験であった。

当時のマイクロプロセッサー及びパソコンの性能は現在とは比べようもなく貧弱で、制御用プログラムの開発においても、数多くの制約があった。例えば、ユーザが直接利用できるメモリー空間は最大約 500kbyte 程度であり、外部記憶としても、640kbyte のフレキシブルディスクであり、実験データの記録には余裕がない状態であった。このため記録形式を工夫するなどして、記録容量を高める必要があった。また、フレキシブルディスクを実験室のような粉塵塵芥が舞う、最悪の環境の中で使用しなければならないことへの不安は最後まで解消されなかった。

パソコン自体の性能も不安定であり、収録ソフトウェアの作成に際して第一位に考慮した最重要事項は、パソコンが如何なる状態で停止しても、それまでの測定・集録したデータは絶対に消失させないことであった。

測定器自体もマイクロプロセッサーの利用により、それ自体でも数多くの機能を保有するようになり、取扱説明書は膨大な量となり、特に異常時に説明書を見ながら操作できる状態ではなくなった。この点からも予め操作に必要な機能は全てを測定・集録ソフトウェアの中に組み込んでおき、測定器に対する操作は、全てパソコンを介して行うことが必要と考えられた。これにより、測定器の誤操作により貴重な実験データを消失する危険性が回避できた。

3. ソフトウェアの改訂作業

以上のような観点から、取り敢えず、学生実験程度の使用に耐えうる基本的機能を有するソフトウェアの作成を行った。

3.1　インターフェースの選定

測定器は、ブリッジ回路の切り替え速度が速く、拡張性の高い機種を選択した。使用するパソコンは実験室で使用すること、可搬性、設置面積などを考慮し、ノート型パソコンとした。当該測定器は接続インターフェースとして、RS232C、GPIB、USB、LAN の各ポートをそれぞれ有するが、ノートパソコンに標準的に装備されている USB ポートを選択した。LAN ポートは、セキュリティ対策が確認できないため、除外した。

3.2　使用言語

制御・測定・集録ソフトウェアを開発するためには、microsoft windows 下の環境を選択するのが尤も妥当であり、使用言語も windows 対応言語となる。今回の場合、旧版が fortran により作成されていることから、移植性を考慮し、microsoft visual basic を使用言語に選定した。

3.3　基本仕様

旧版作成時の環境と最も大きく変わった点は次の二点である。

(1) パソコンのメモリー容量
(2) 測定器に可搬型メモリーカードが装備され、測定データを書き込むことができること。

windows 環境下であることから、内部メモリーとして使用できる空間は実質無限と見なせ、潤沢に配列変数の宣言が行えるようになり、全ての測定値を内部メモリー空間上に配置することが可能となった。これにより、制御用に可視化しているグラフの再描画は極めて高速に行えるようになり、必要な部分だけを拡大して取り出すなどの操作も極めて有効に行うことが可能となった。

測定器の可搬型メモリーカードに全測定値をそのまま書き込むことが可能となったので、測定値の保存が冗長化でき、信頼性が極めて向上したこと。また、パソコン側においても、外部記憶が密閉型ハードディスク、或いは、USB メモリーなどの機械駆動装置を持たない媒体を選択することも可能となったので、フレキシブルディスクに比較して、その安全性も極めて向上した。

以上の観点から、旧版のプリンター出力機能を削除した。データ消失に備えた機能であったが、最早その必要はないと判断し、むしろ、機械的駆動装置を実験中に必要とすることが危険と判断した。

また、旧測定器ではハードウェア操作で設定していた機能が、新測定器では全てソフトウェア操作にて設定することになったので、これらの設定も全てソフトウェアを介して行うことにした。また、時刻同期もデータ検証には欠かせざる条件であるので追加した。

以上のように、測定器に対する操作は、原則として、電源の入切だけになるように設計した。

3.4　実行結果

ソフトウェアを起動すると図2が表示され、実験開始前の全ての初期設定・確認作業がここで行える。ただし、測定対象のブリッジ回路設定は図3の画面を表示させて行う。設定可能な全ての回路設定値が組み込まれて折り、選択可能である。また、「チェック」機能により適切な設定がなされたかどうかも検証できる。

図2　初期設定画面
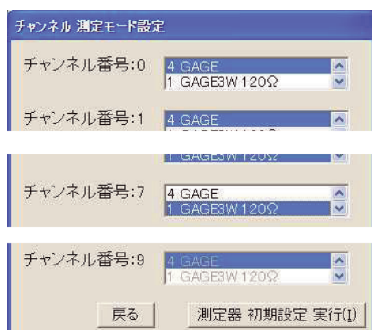
図3　測定モード指定画面（抜粋）

計測及び測定値一覧を表示するのが、図4であり、実験開始後の中心画面である。通常の測定はこの画面で全て処理できる。

DATA View

測定(S)　荷重番号: 200350　モニターグラフ(G)　終了(E)

#	LOAD#	Time	ch.0	ch.1	ch.2	ch.3	ch.4	ch.5	ch.6	ch.7
1	100008	15:30:46	−0003415	−0003370	+0004522	−0005551	−0000025	+0000121	−0000176	−0000086
2	100017	15:30:48	0	−1	0	0	0	0	−1	0
3	100020	15:30:53	+0000001	−0000026	+0000000	+0000000	−0000001	+0000000	−0000002	−0000002
4	100030	15:30:54	+0000001	−0000030	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000002	−0000002
5	100040	15:30:56	+0000482	+0000475	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000002	−0000002
6	100050	15:30:57	+0000284	+0000661	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000003	−0000002
7	100060	15:30:59	+0000743	+0000336	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000002	−0000002
8	100070	15:31:01	+0000418	+0000387	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000003	−0000002
9	100080	15:31:02	+0000185	+0000805	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000003	−0000002
10	100090	15:31:03	+0000158	−0000008	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000003	−0000002
11	100100	15:31:04	−0000212	+0000001	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000002	−0000002
12	100110	15:31:05	−0000197	−0000363	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000003	−0000002
13	100120	15:31:06	−0000437	−0000607	+0000000	+0000000	−0000001	+0000000	−0000003	−0000002
14	100130	15:31:06	−0000595	−0000768	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000003	−0000002
15	100140	15:31:07	−0000701	−0000871	+0000000	+0000000	+0000000	+0000000	−0000003	−0000002
16	100150	15:31:08	−0001360	−0000641	+0000000	+0000000	−0000001	+0000000	−0000003	−0000002

図4　測定結果表示画面

加力制御用グラフを表示させるためには、グラフ表示座標の最大値と最小値及びそれぞれの表示対象を図5により定義する。このソフトウェアが対象と想定している実験は、学生実験程度の簡単なものであるので、座標値は測定値そのものを流用している。また、縦軸と横軸についても測定対象そのものを流用している。図6は模擬的に表示データを作成し表示した例である。

図5　グラフ出力定義
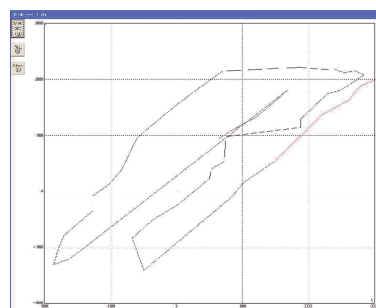
図6　制御用グラフ画面出力例

4. おわりに

実験装置はその実験のために専用に作成し、試験体もその目的のために作成するものである。測定･集録ソフトウェアについても、単に、集録だけを考えれば、汎用製品でも十分に使用できる。しかし、実験装置の一構成要素として加力制御を行うには、汎用品では使用に耐えない。制御・測定・集録機能を併せ持つ専用ソフトウェアが必要である。今回作成したソフトウェアはこれらの基本機能を有しており、制御用図化表示機能の部分改良で実用に投入できる。

さらに、油圧サーボ機構の導入や、機械式ジャッキをステップモータにより制御するなどにより、完全自動化も可能である。

参考文献

[1] 浅草肇、角徹三：静的加力構造実験データの集録方法. 第 12 回情報システム利用技術シンポジウム論文集、pp.313-318, 平成 3 年 3 月

[2] 角徹三、浅草肇他：高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱・はり外部接合部のせん断抵抗性状. コンクリート工学論文集第 3 巻第 1 号、pp.87-95, 平成 4 年 1 月

A Study on Structural Experiments Data Logging Procedure

ASAKUSA Hajime

Tsukuba University of Technology

Abstract: In this paper, the conventional procedure of data logging in structural experiments involving the use of a personal computer is summarized and new developmental software that has several elemental functions is proposed.

Keywords: structural experiment, loading, control, store, software